

遮光を活用した異方性反射の印刷法

櫻井 快勢† 土橋 宜典‡ 西田 友是§†

株式会社ドワンゴ UEI リサーチ† 北海道大学‡ 広島修道大学§

概要

本稿では、異方性反射を表現するための印刷パターンの生成法を提案する。本手法は、基材に所定の顔料パターンを印刷し、その上に、指定方向にストライプ状に並んだ微細な壁（遮光壁）を配置する。印刷された面には、微細な凹凸形状が形成されており、凸部は遮光壁となり、底面には反射光の色を示すための顔料が塗布されている。複数の指定方向で遮光壁を印刷することで、見る方向によって異なる色が現れる。ここでは、UV プリンタを用いて底面と遮光壁を印刷する。底面の印刷では、顔料であるシアン、マゼンタ、イエローの三色の最適な組み合わせを求める。遮光壁は、UV 硬化インキを積層し、形成する。

1. はじめに

近年、見る方向に応じて、異なる絵を呈示するような反射板の設計法が提案されている[1,2]。これらの研究には、反射を操作するような印刷技術が使われている。文献[1]では、異方性反射を用いているが、この手法では反射分布に制限があり、3枚以上の画像を呈示することができない。本研究では、異なるアプローチで、任意の反射特性を基材に付与する手法を提案する。具体的には、遮光を用いて、強い異方性反射を示す双方向反射率分布関数（BRDF）の印刷を実現する。BRDFは、任意の方位角、仰角方向からの入射光の反射率分布を定義する関数である。すなわち、一定の光が入射したとき、視線方向に依存して異なる輝度が観察できる。複数の画像が現れるようなBRDFを表現するパターンの印刷により、目的を達成する。

2. 関連研究

これまでに Pjanic と Hersch らによって、2枚のカラー画像を表現する2つの手法が提案されている。一つは、縦横で異なる色の格子パターンを金属面に印刷することで、異方性反射を実現した手法である。これにより、2枚の異なる色の画像を1枚の金属板で表現することを可能とした[1]。もう一つは、鏡面反射と拡散反射を用いて異なる画像を表示する手法である[2]。この手法では、白色顔料を混ぜて印刷することで、鏡面反射と同じ輝度を拡散反射によって表現することができ、白色顔料が混ざっていない部分と異なる輝度を表せる。これを応用し、

見る方向によって、異なる画像が表示される。しかしながら、これらの方法は、どちらも2枚の画像までしか呈示できない。

任意のBRDFの印刷に取り組んだ研究もある。Lan らは、色と反射率分布を考慮したBRDFの印刷法を提案した。微細な凹凸形状の上に、目的の反射色になるように印刷する[3]。しかし、この手法では、指向性の強い異方性反射は実現できず、画像を表示するようなBRDFの実現は困難である。Levin らは鏡面反射光分布を微細な凹凸形状パターンで操作する手法を提案した[4]。しかし、色の操作は不可能である。

3. 遮光壁による異方性反射の印刷

本手法では、予め、基材に所定の色のパターンを印刷し、その上に、遮光壁を配置する。基材には、反射光の輝度を高くするために、金属板を用いる。図1に示すように、平行に並んだ遮光壁は、これらに平行する光のみを底面に到達させるため、底面の色が知覚される。それ以外の光は遮光され、知覚されない。そのため、異方性反射のような挙動を表現できる。

本手法では、遮光壁をUVプリンタのUV硬化インキを積み上げることで形成する。

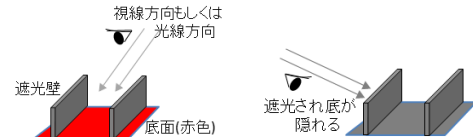


図1: 遮光壁の模式図。(左図) 遮光壁と視線もしくは光線が平行であるとき、底面の色が知覚される。(右図) 遮光壁と視線もしくは光線が平行ではないとき、底面は知覚されない。

所望の画像が反射によって表現されるようなBRDFを求めるための目的関数を定義する。まず、視線方向 ω_o に対して観測される反射板上の位置 \mathbf{x} の輝度 L_o は次式で表される、

$$L_o(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda) = \int L_i(\mathbf{x}, \omega_i, \lambda) f(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o, \lambda) (\mathbf{n} \cdot \omega_i) d\omega_i \quad (1)$$

ω_i は入射方向、 λ は光の波長とする。輝度 L_o と目的の画素値 I の類似度を評価する目的関数 E は、次式で示される。

$$E_1(\mathbf{x}) = \int |L_o(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda) - I(\lambda)| d\lambda \quad (2)$$

また N 枚の目的画像があるときは次式で示される。

$$E_N(\mathbf{x}) = \sum_{k=0}^{N-1} \int |L_o(\mathbf{x}, \omega_{ok}, \lambda) - I_k(\lambda)| d\lambda \quad (3)$$

Printing method for anisotropic reflection using occlusion

† Kaisei Sakurai, Dwango co. ltd. UEI research

‡ Tomoyuki Nishita, Hirosima Shudo University and UEI research

本手法では、目的関数 E_N が最小になる BRDF f の印刷パターンを生成する。BRDF f は、次式のように、複数の BRDF に分解できるとする。

$$f(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o, \lambda) = \sum_{k=0}^{N-1} f_k(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o, \lambda) \quad (4)$$

さらに、それぞれ異方性反射の方向成分のみを示す f_r と光のスペクトルを示す f_a に分解できるとする。

$$f_k(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o, \lambda) = f_{rk}(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) f_{ak}(\mathbf{x}, \lambda) \quad (5)$$

このとき、遮光壁による異方性は f_r に対応し、 f_a は底面の色に対応する。

3.1 方向成分

遮光壁で異方性を実現する。基材は金属面であるため、底面の反射は強い鏡面反射を想定する。図 2 に示す模式図のように、遮光壁の長さを l 、高さを h 、とし、壁同士の間隔を d 、遮光壁の対角線の長さを d' 、基材の平面と光の方向の成す角を θ 、方位角に関して遮光壁と光の方向の成す角を φ として異方性を考える。光線が遮光壁によって遮られる仰角のとき、入射光と反射光が遮光壁の間を抜けるような光を反射できる底面の範囲は、 $l(d - l \tan(\varphi))$ の面積を持つ平行四辺形の領域となる。遮光壁の間の底面の面積は、 ld であるため、 $l(d - l \tan(\varphi))/ld$ が、反射された光を観察できる割合となる。整理して、方位角 φ で入射する光が底面に到達し、反射光も遮光壁を抜ける割合を次式の f'_r で表すことができる。

$$f'_r(\varphi) = 1 - \frac{l \tan(\varphi)}{d} \quad (6)$$

ただし、 $0 \leq f'_r(\varphi) \leq 1$ とする。光線と視線は、遮光壁に遮られるため、互いにかけて合わせた次式で、異方性反射の関数 f_r を定義する。

$$f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = f'_{rx}(\varphi(\omega_i)) f'_{rx}(\varphi(\omega_o)) \quad (7)$$

f'_{rx} は位置 \mathbf{x} での f'_r とし、 $\varphi(\omega_{i|o})$ は、光の入射方向 ω_i もしくは反射方向（視線方向） ω_o と遮光壁との方位角上の成す角を示す関数とする。

ただし、光の入射、もしくは反射方向の底面との仰角が大きく、光が上方から遮光壁を越える場合、光が底面に届くため異方性が現れない。そのため、関数 f_r は常に 1 を返す関数となる。異方性が現れる範囲で、最も浅い仰角になるのは、遮光壁と隣の遮光壁の対角線上である。この仰角以下であれば、異方性は現れる。すなわち、 $\arctan(h/d') < \theta$ では、 $f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = 1$ となる。

3.2 スペクトル成分

次に、底面に印刷されるパターンを生成する。このパターンは、印刷の顔料である CMY の割合を示すものであり、反射光の RGB を決定する。CMY と RGB は補色の関係である。また RGB と λ は対応がとれる。そのため、 λ を RGB と読み替えて、式(3)で示された目的関数 E が最小になるように、顔料 CMY の割合を変数とし、最急降下法で CMY の最適な割合を求める。

4 結果

印刷には、UV プリンタ、Roland VersaUV LEF-12 を用いた。4 画像を呈示する反射板を作成し、見る方向を変えて、反射板を撮影した結果を図 4 に示す。実験の結果、所望の画像が提示されたことを確認した。

本手法では、遮光壁の長さや遮光壁間隔を制御することで、異方性の強度を変更することができ、提示したい画像に大きく貢献するように設定できる。そのため、3 枚以上の画像を呈示する反射板を設計できた。

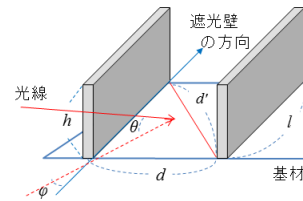


図 2: 光線と遮光壁の関係の模式図。

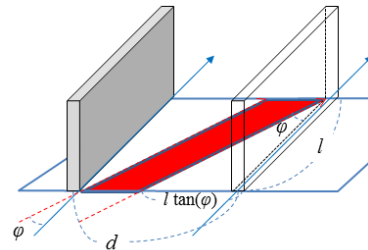


図 3: 遮光の割合の模式図。入射光が底面に届き、遮光壁の間を抜ける光を反射する領域を赤く示す。

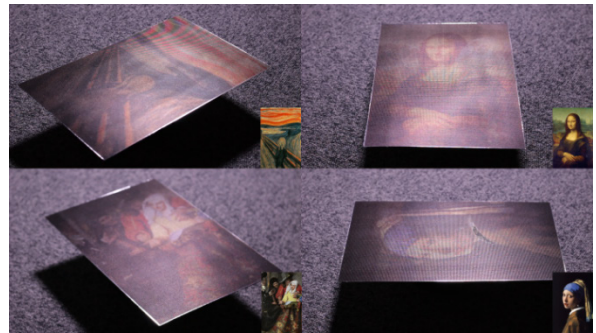


図 4: 4 画像を呈示する反射板。

参考文献

- [1] P. Pjanic, R. D. Hersch: "Color changing effects with anisotropic halftone prints on metal," ACM Transaction on Graphics, 34, 6, Article 167 (2015)
- [2] P. Pjanic, R. D. Hersch: "Color imaging and pattern hiding on a metallic substrate," ACM Transaction on Graphics, 34, 4, Article 130 (2015)
- [3] Y. Lan, Y. Dong, F. Pellacini, X. Tong: "Bi-scale appearance fabrication," ACM Transaction on Graphics, 32, 4, Article 145 (2013)
- [4] A. Levin, D. Glasner, Y. Xiong, F. Durand, W. Freeman, W. Matusik, T. Zickler: "Fabricating BRDFs at high spatial resolution using wave optics," ACM Transaction on Graphics, 32, 4, Article 144 (2013)